

# NMR 実験用超伝導マグネットの試作

八 木 寿 郎<sup>\*</sup>・井 上 正<sup>\*</sup>・立 川 敏 明<sup>\*</sup>

加 藤 進<sup>\*</sup>・八 重 口 修 省<sup>\*</sup>

## Some Remarks about the Superconducting Magnet for NMR Experiment

Hisao YAGI, Masasi INOUE, Toshiaki TATSUKAWA,

Susumu KATO, Osami YAEGUCHI

(Received March 29, 1971)

Recently a superconducting magnet has been constructed with the use of the superconducting wire SUPER SW 25, which is a metallurgically bonded copper jacketed wire, the core of which is made of superconducting Nb-50Ti alloy.

A performance of this superconducting magnet is that the critical exciting current is 35 A, the maximum magnetic field strength is 45 KG and the uniformity of the field is about  $10^{-4}$  at 5 mm at the center and along the axis of the magnet. Then this magnet is suitable for the nuclear magnetic resonance experiment at the liquid helium temperature.

### 1 緒 言

超伝導線は臨界温度以下ではその電気抵抗が零であるためジュール損失を生じないという利点を用いて、高磁場が発生できる超伝導マグネットを容易に自作できることを前回報告した<sup>(1)</sup>。

われわれの研究目的はこの超伝導マグネットを用いて、液体ヘリウム温度 (4.2°K) でNMRの実験を行なうことである。前回報告した超伝導マグネットは、マグネットの中心で半径 0.5cm の球形内における磁場の均一度が99.8%であるため、これを用いてはNMR実験を行なうことができない。そこで今回新たにNMR実験を目的とした高均一度超伝導マグネットを試作したのでこれについて報告する。

### 2 使用線材

われわれの用いた超伝導線は 前回と同様 真空冶金

KK の商品名 SUPER, SW25 である。この線材は図 1 に示すように Nb—Ti 線の上に銅を被覆し、その

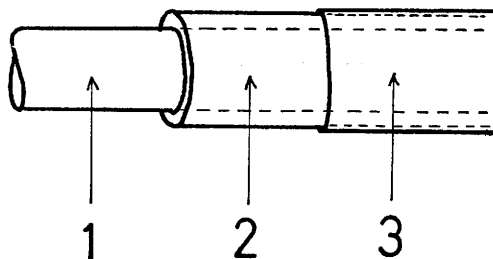


図 1 超伝導線  
組成 Nb—50Ti  
臨界温度 約10°K  
臨界磁場 約122KG  
1. Nb—Ti 線 (0.25mmφ)  
2. 銅被覆 (0.05mm厚)  
3. 絶縁被覆 Formvar

\* 応用物理学科

外周を FORMVAR で絶縁被覆したものである。この Nb—Ti 線は 公称臨界温度が  $10^{\circ}\text{K}$  で、臨界磁場は約  $122\text{KG}$  である。

この線材のように超伝導線に銅被覆すると次のような効果が期待できる。すなわち

- (1) 銅の良好な熱伝導性により線材の冷却効果を良くする。
- (2) フラックスジャンプによる急激な磁束の変化が銅中の渦電流によって緩和される。
- (3) 大きなフラックスジャンプによって線材にノーマルな部分が生じても電流は銅にバイパスされ、発生するジュール熱は小さい。

これらの効果によって、以前高磁場発生用超伝導線材に共通の問題であった低磁場における不安定性が解決された。実際、前回報告したわれわれの低磁場用小型超伝導マグネットも非常に安定に動作させることができる。

図2にこの Nb—Ti 線をコイルにしたときの臨界電流と臨界磁場の関係を示す。この図からもわかるようにこの線材の臨界電流は大きく、Degration 効果は比較的小さくコイルにしたときの性能が非常によいことがわかる。

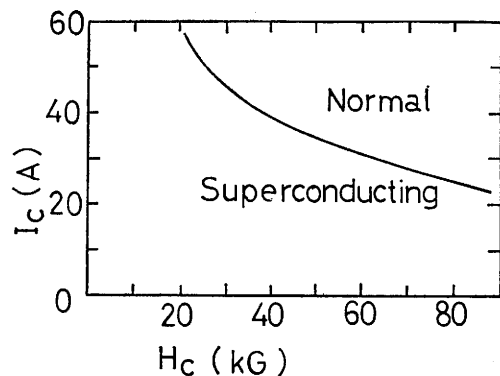


図2 コイルにしたときの臨界電流と臨界磁場の関係

### 3 超伝導マグネットの設計

今回は  $1,200\text{m}$  の Nb—Ti 線を用いて、中心  $\pm 0.5\text{cm}$  で  $10^{-4}$  程度の磁場の均一度を得ることを目的とし、なおかつできるだけ高磁場が発生できるように設計した。発生磁場、均一度などの計算式は前回報告したので省略する。今回のマグネットの発生磁場は  $1\text{A}$  当り  $1.3\text{KG}$  であり、この関係を図2に書き入れれば臨界電流とそれに伴って最高磁場を求めることができる。表1に第1号超伝導マグネットと、今回製作した第2

号超伝導マグネットの形状と性能を対比して示しておく。

表1 超伝導マグネットの形状と性能

	第1号マグネット	第2号マグネット
コイルの長さ	$60\text{mm}$	$130\text{mm}$
外 径	$25\text{mm}$	$43\text{mm}$
内 径	$13\text{mm}$	$13\text{mm}$
磁場発生空間	$10\text{mm}$	$10\text{mm}$
全 巻 数	3,400回	1,400回
線 の 長 さ	$200\text{m}$	$1,200\text{m}$
発 生 磁 場 ( $1\text{A}$ 当り)	$0.65\text{KG}$	$1.3\text{KG}$
均 一 度 ( $\pm 0.5\text{cm}$ )	99.8%	99.99%
最 大 電 流	$40\text{A}$	$35\text{A}$
最 大 磁 場	$26\text{KG}$	$45\text{KG}$
インダクタンス	$4.14 \times 10^{-2}$ ヘンリー	$71.5 \times 10^{-2}$ ヘンリー

## 4 実 験 装 置

### 4・1 マグネットの組み立て

超伝導マグネットは図3に示すように組み立てられている。超伝導マグネットは振動や機械的なショックによって超伝導が破れることがあるため、マグネットの支持は特にしっかりとしなければならない。われわれは約  $10\text{mm}\phi$  の銅パイプでマグネットを支持し、上部は熱伝導を遮断するためにステンレスパイプを用いて固定している。

超伝導線を接続する場合、永久電流を流す上からも非常に注意しなければならない。われわれは図4に示すように超伝導線の銅被覆を硝酸で溶かしてはがし、超伝導線自身をより合わせてインジウムで包み、銅板で圧着している。

また今回も前回報告したサーマル・スイッチを用いて永久電流方式で磁場を使用した。

### 4・2 冷 却 装 置

超伝導マグネットは液体ヘリウム中で運転しなければならないが、これには普通簡単に経済的なガラス製の dewar を用いる。しかし超伝導マグネットが大きくなると強度の点、また万一マグネットの超伝導が破れて液体ヘリウムが急激に沸騰したとき dewar を破壊する心配があるため、われわれは金属製の dewar を使用することにした。

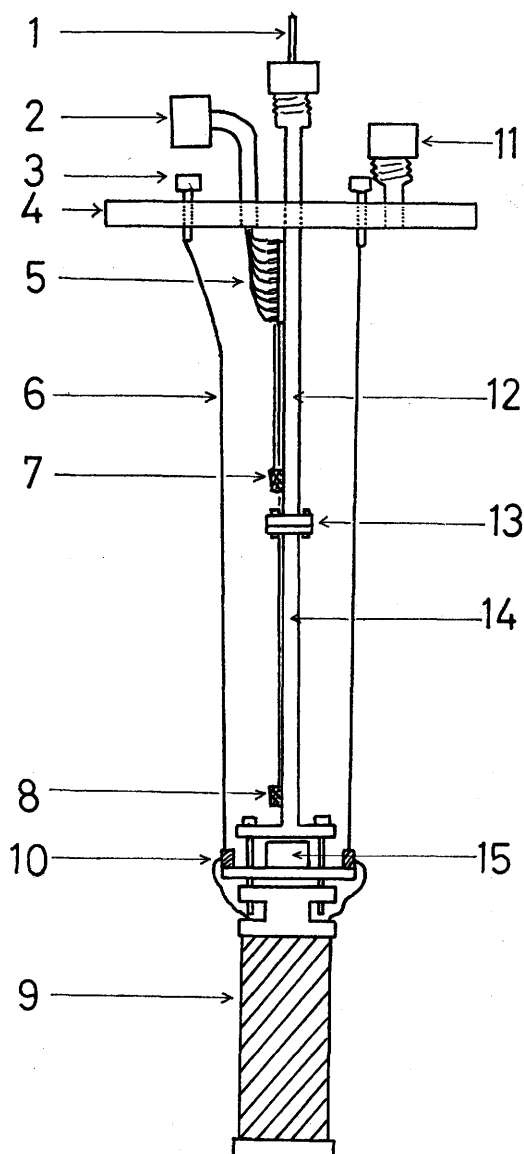


図3 超伝導マグネットの組み立て図

1. Bi 移動用ステンレスパイプ (5 mm $\phi$ )
2. 測定系コネクター    3. 電源端子
4. ステンレス製フランジ    5. 測定系中継端子
6. 電源用銅線 (1 mm $\phi$ )    7. 8. 液面計
9. 超伝導マグネット    10. 接合部
11. 液体ヘリウム汲み入れ口
12. ステンレスパイプ    13. フランジ
14. 銅パイプ    15. サーマル・スイッチ

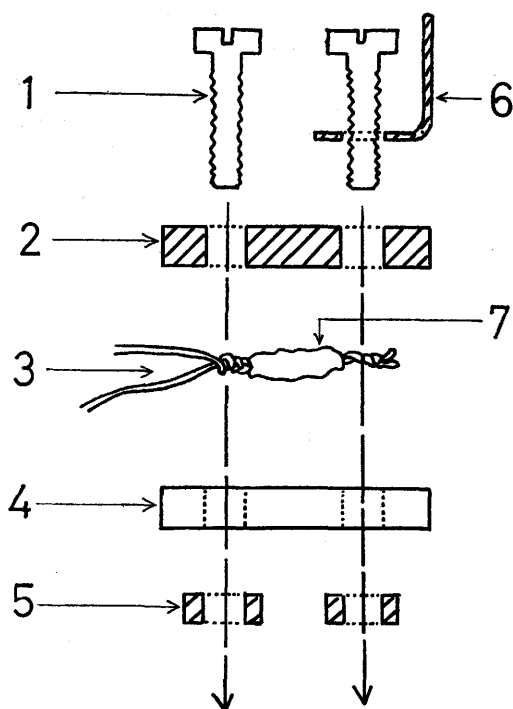


図4 Nb—Ti線, Nb—Ti線, 銅線の接合部

1. ステンレス製ボルト
2. 4. 銅板 (10 mm $\phi$   $\times$  3 mm)
3. Nb—Ti線    5. ナット
6. 銅線接続用端子    7. インジューム

金属製液体ヘリウム用 dewar は非常に高価であるため、図5に示すようなステンレス製 dewar を自作した。この dewar の接合部は全て銀ろう付けで  $10^{-6}$  Torr の真空度に耐えるように製作した。この dewar には一度に約 1.5 l の液体ヘリウムを汲み入れることができ、一度液体ヘリウムを汲み入れれば 1~2 時間実験できる。

#### 4・3 液 面 計

実験に金属製 dewar を用いたため、dewar の内部が外から見えないので液体ヘリウムの液面を知るための液面計が必要である。これには前に報告した<sup>(2)</sup>Ta 液面計、カーボン抵抗液面計を用いている。

#### 4・4 安全対策

われわれの用いている Nb—Ti 線は銅被覆してあるため、もしマグネットの超伝導が破れても電流減衰の時定数が大きく、誘起される電圧は比較的小さい。問題となるのはジュール熱による液体ヘリウムの沸騰であるが、われわれはステンレス製の dewar を用いた

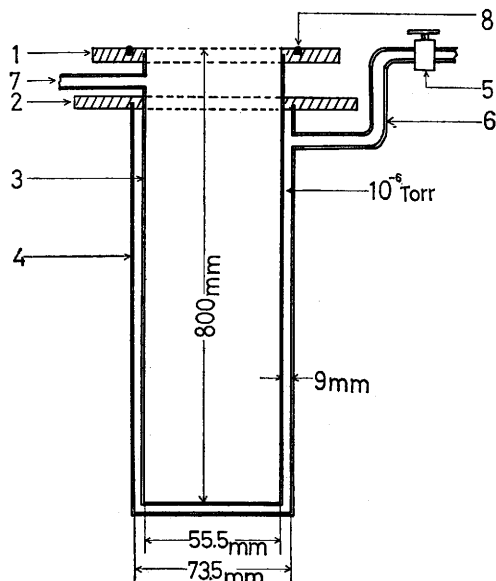


図5 自作した金属 dewar

- 1,2. ステンレス製フランジ
3. ステンレス管 (肉厚 2 mm)
4. 真ちゅう管 (肉厚 3 mm)
5. 真空バルブ
6. 排気パイプ
7. ヘリウム回収パイプ
8. オーリング

こと、また dewar にはたかだか 1 ~ 1.5  $\ell$  程度の液体ヘリウムしか入らないため全部がガスとなっても 1  $m^3$  程度のガスであり、回収装置のヘリウムタンクが 1  $m^3$  の容量をもっており、更に 2  $m^3$  の風船を具えているので特別な保護装置は取り付けしていない。

#### 4・5 電 源

一般に超伝導マグネットの励磁には低電圧大電流容量のものが使用される。われわれはマグネットの電源に自動車用バッテリーを用いている。リップルの心配もなく、このマグネットの臨界電流値 35 A までは十分に流すことができる。

#### 4・6 磁場検出装置

前回と同様既知の電磁石で校正した Bi の磁気抵抗効果を利用し、その抵抗変化を四端子法によって測定した。図 6 にこの回路を示す。標準抵抗の精度が  $10^{-5}$  であり、精密型電位差計の精度は  $10^{-6}$  であることから測定精度は  $10^{-5}$  程度期待できる。

#### 5 実験結果

超伝導マグネットの磁場測定には太さ約 0.5 mm  $\phi$  で

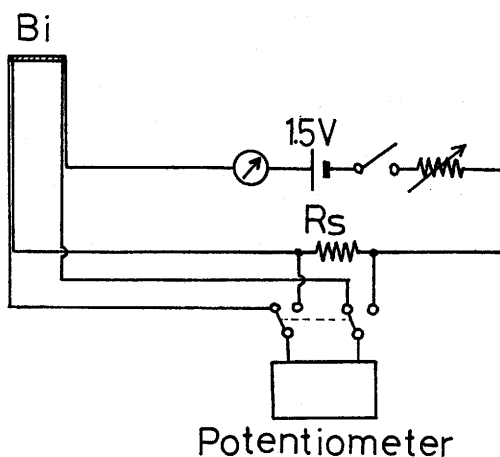


図6 4端子測定回路

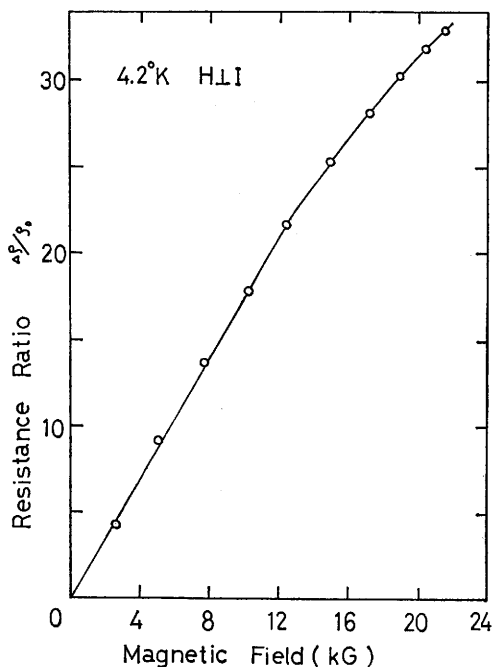


図7 Bi の磁気抵抗

長さ約 7 mm の Bi の磁気抵抗を用いた。図 7 が今回用いた Bi の 4.2°K における磁場と磁気抵抗の関係である。これはわれわれの研究室にある最高 22 K G の磁場が発生できる電磁石で測定したものである。普通 Bi が単結晶であれば磁気抵抗は低磁場で抵抗変化が磁場の強さの 2 乗に、高磁場で 1 乗に比例する。われわれの用いた Bi は高磁場で飽和の傾向が見られるためこの Bi 試料はおそらく単結晶ではないと思われる。

超伝導マグネット中でこの Bi の磁気抵抗を四端子

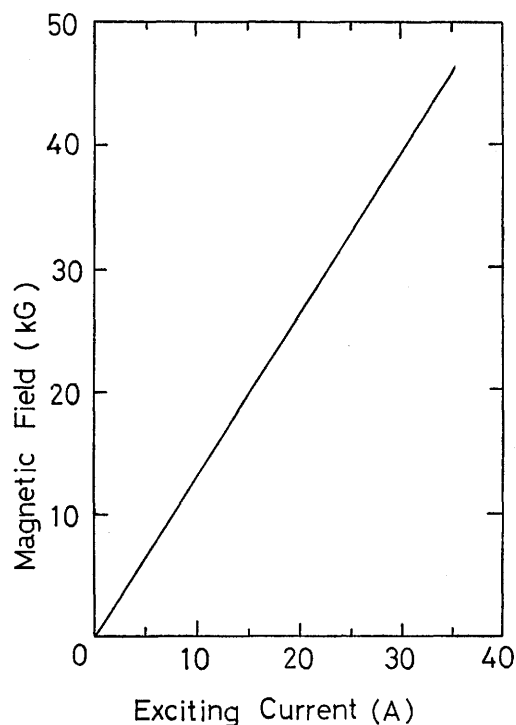


図8 超伝導マグネットの励磁電流と発生磁場の関係

法で測定し、図7を用いて校正したのが図8に示す励磁電流と発生磁場の関係である。この結果は計算値とほぼ一致している。図7を用いては22KGまでしか校正できないが22KGまではこのマグネットの励磁電流と発生磁場が直線的であること、また理論的にも超伝導マグネットはジュール損失がなく電流と磁場は直線的な関係でなければならないことから22KG以上もその直線を延長した。

図9が超伝導マグネットの磁場の均一度である。中心 $\pm 1\text{cm}$ で99.8%の均一度であり、中心 $\pm 5.5\text{cm}$ までが90%以内の均一度である。このことから非常に磁場の均一性の高いマグネットであるといえる。

さらに $\pm 0.5\text{cm}$ 以内の磁場の均一度を測定するためマイクロメーターを用いてBi試料を1mm間隔で移動させたが、これは磁場の均一度よりも精密型電位差計による測定誤差の方が大きく出て、正確な磁場の均一性を測ることができなかった。

## 6 ま と め

今回製作した超伝導マグネットは非常に細長い形からも均一性のよさがうかがえる。実際、測定結果も非常に良好であった。ただNMR実験に用いるための $\pm 0.5\text{cm}$ 内の正確な磁場の均一度が出せなかったこと

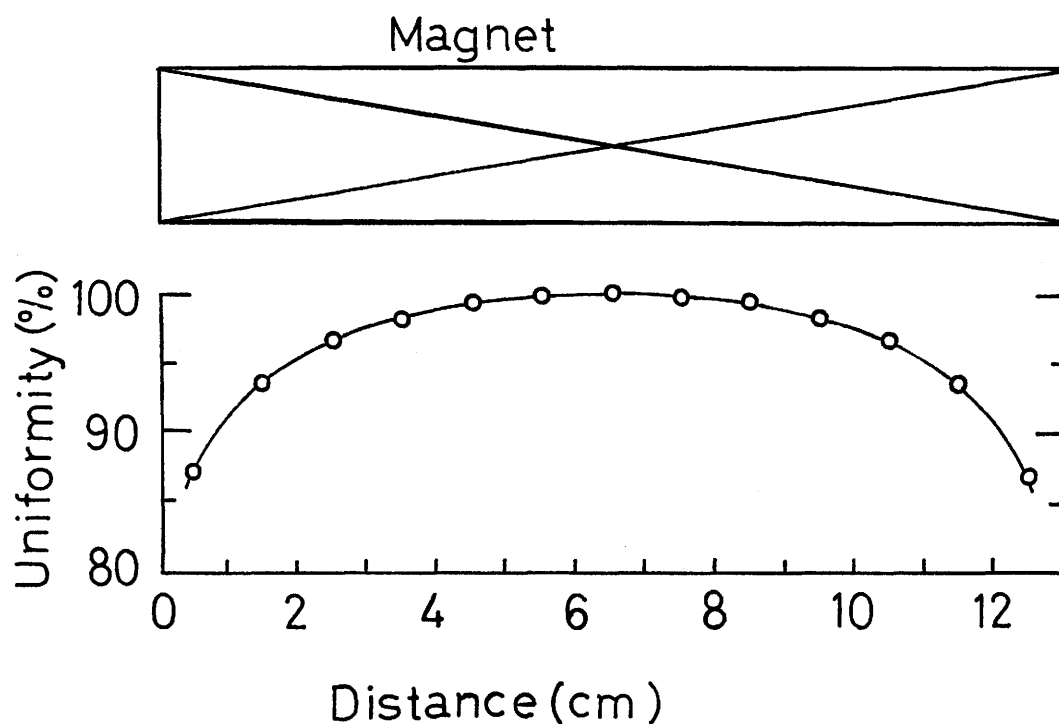


図9 超伝導マグネットの均一度

は残念である。一応このマグネットを用いてNMR実験を行ない、さらに高均一度が要求されればマグネットの両端にシムをつけ均一度を上げることを考慮している。

また自作した金属製 dewar も非常に良好にはたっている。ただ外側のパイプに真ちゅうを用いたため、冷却用の液体窒素の消費が激しいことが難点である。このため現在新しくこれよりひとまわり大きく、総てステンレス製の金属製 dewar を製作している。

最後にマグネットの製作を手助けしてくれた卒論学生の 栗田 正信君、田牧 伸人君、畠山 重雄君、また dewar 製作の手助けしてくれた 坪川勝治技官に感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- (1) 八木・井上・立川・加藤・八重口；福井大工報 19,93 (1971)
- (2) 八木・井上・立川；福井大工報, 18,205 (1970)

(昭和46年3月29日受理)